

## 中性粒子入射加熱システムにおける光中性化セル内の光強度空間分布評価

著者	石富 雅士
雑誌名	東北大学電通談話会記録
巻	90
号	1
ページ	68-69
発行年	2021-08-20
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00132813">http://hdl.handle.net/10097/00132813</a>

修士学位論文要約（令和3年3月）

# 中性粒子入射加熱システムにおける光中性化セル内の光強度空間分布評価

石富 雅士

指導教員：安藤 晃

## Evaluation of Light Intensity Spatial Distribution in the Photo Neutralizer Cell for Neutral Beam Injection System

Masashi ISHITOMI

Supervisor: Akira ANDO

Three ways of neutralizers were compared from the viewpoints of neutralize efficient and beam divergence degree. In that simulation, only photo neutralizer and gas neutralizer were inferior in terms of divergence and neutralize efficient respectively. However, by combining two methods, the performance improved, so for realization of nuclear fusion, not only gas neutralizer but also photo neutralizer should have been researched. Laser light intensity distribution was simulated and measured by this research. For measurement, the equipment was installed. By using cylindrical mirrors, the laser light returned between the mirrors was measured by the equipment.

### 1. はじめに

これまで、火力発電や原子力発電によって電気エネルギーが生み出されてきた。しかしながら、火力発電は温室効果ガスによる地球温暖化、また原子力発電に関しては放射性廃棄物の処理といった問題点が存在する。また、近年では2030年を達成年限とする持続可能な開発目標SDGs（Sustainable development Goals）として掲げられている17の目標の中でエネルギーに関する目標も制定されている。そこで安全かつクリーンな発電方法として、核融合発電が注目され、研究が進められている。地球上で核融合反応を生じさせるためには、高密度でプラズマを閉じ込めつつ、1億2000万度まで加熱する必要があると言われており、その加熱方法として中性粒子入射加熱システム（Neutral Beam Injection System）が採用予定である。これは、生成したプラズマを静電加速でビーム状にし、荷電ビームを中性化した状態で核融合炉に入射することで加熱する方法である。このとき、核融合炉の閉じ込め用超電導コイルによる磁場の影響を受けないように中性化を行っている。この中性化セルにおいて、現在、ガス中性化と光中性化が検討されている。

### 2. 中性化セルのシミュレーション

ガス中性化とはセル内にガスを注入して、イオンビームが通過する際、ガスとの荷電交換反応を誘発することで中性化する方法である。構造が簡単というメリットがある一方で、中性化できる割合を示す中性化効率が60%程度と低いデメリットがある。一方で光中性化は、レーザー光をイオンビームに対して垂直方向に入射することで、ビームがレーザーを通過する際に光脱離反応によって、イオンが中性

化される。この光中性化では90%という高い中性化効率が期待されている。しかし、その構造の複雑さなどによる実現の難しさからシミュレーションのみ行われてきた。中性化セルのPICシミュレーションの結果を図1に示す。それぞれ、シミュレーションを始めてから7.5 $\mu$ sec後の結果を示している。ガス中性化のみの結果から分かるように、ビームは収束している。しかしながら、その中性化効率は52.4%と比較的低い結果となった。光中性化のみの結果を見るとビームが大きく発散していることが確認できる。中性化効率は72.8%であり、ガス中性化と比較して高い値となった。ビームが発散した理由としては、次のことが考えられる。ガス中性化の場合、中性化セル内がガスで満たされている。そこにイオンビームが入射することで、内部でガスの電離によるビームプラズマが発生し、電界が生じたことで負イオン同士の反発で生じるビーム発散を抑えたと考えられる。ガス中性化と光中性化を組み合わせた方法においても、ビーム発散が抑えられていることから、この理由が有力である。従って、ガス中性化はビーム発散を抑える効果があると言える。また、ガス中性化と光中性化を組み合わせた場合の中性化効率は77.2%と、3つの方法の中で最も高い値となった。これらの結果から、ガスと光を組み合わせた中性化セルが現状、高パフォーマンスかつ実現性の高い方法として有力であると考えた。

### 3. レーザー光強度分布測定環境の構築

これまで、光中性化に必要な出力を有するレーザーが存在せず、実機での研究が行われていなかった。しかしながら、近年レーザーの高出力化が進み、光中性化の実現性が高まっている。実際には、中性化

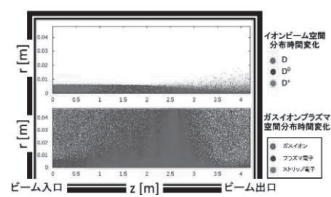
に必要な出力より低い出力のレーザー光を向かい合わせた2枚の高反射鏡間を往復させることで、十分な出力のレーザーを使用したときと近い状況にする方法が検討されている。そのため、光中性化を行うにあたって、イオンビームが通過するレーザーがミラー間において、どのように分布しているか把握することが、狙い通りに中性化を行う上で重要な点となる。そこで、そのレーザー光空間強度分布を測定する実験を行い、結果を検討することを目的とした。はじめに、水平方向  $360^\circ$  いかなる角度から入射してくるレーザー光を測定することのできる検出用ディテクターを作成し、その評価実験を行った。その結果を図2に示す。ディテクター先端に金属球を取り付け、入射したレーザー光をその金属球で垂直方向に反射させることで、どの角度のレーザー光にも対応できる。レーザー光を中心として、検出用ディテクターを $\pm 1\text{mm}$ 、 $0.1\text{mm}$  刻みで移動させ、レーザー光の検出を行った。その結果、高い分解能でレーザー光を検出できることが確認できた。

#### 4. レーザー光分布測定

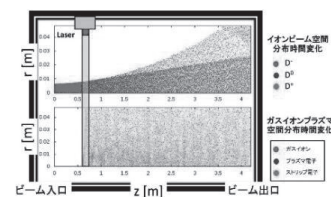
今回作製した検出用ディテクターでレーザー光を検出できることが確認できたため、次に、レーザーを複数回往復させ、その光強度を測定する実験を行った。曲率  $80\text{mm}$  と  $60\text{mm}$  の円筒鏡を向かい合わせて配置し、その間を往復するレーザー光に対して、ビーム進行方向に沿ってディテクターをスイープさせた。ミラー間隔は  $70\text{mm}$  とし、鏡の角度を変更して2パターンで測定を行った。測定結果を図3に示す。反射回数とともに強度が低下する傾向が確認された。これは、反射損失によるものだと考えられる。また、鏡の角度を調整することで光を狭い範囲に集中させることができた。今回作成した強度分布の計測装置によって、今後、どのようにレーザーが反射しているかを確認することができるため、光中性化において必要なセルの設計が可能になると考えられる。

#### 5. まとめ

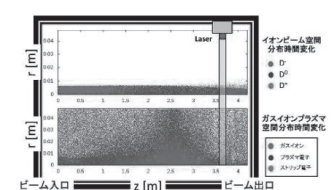
本研究では、光中性化セルにおけるレーザー光の強度分布を測定するための装置の構築および、実測を行った。また、中性化セルに関するPICシミュレーションの結果も併せて検討した。シミュレーション結果より、ビームの発散を抑えつつ、高中性化効率を実現するためには、ガス中性化と光中性化を組み合わせる手法が最も効果的であるという結論に至った。また、測定では、基本的なミラー配置の下で光強度分布を測定することに成功した。今後は、実際にイオン源内に光中性化セルを導入し、中性化することを目標とする。



(a)ガス中性化



(b)光中性化



(c)ガス中性化+光中性化

図1 中性化セルPICシミュレーション

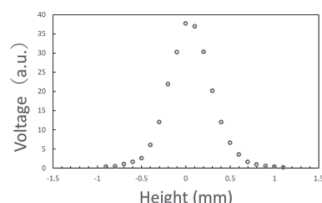


図2 ディテクター評価実験

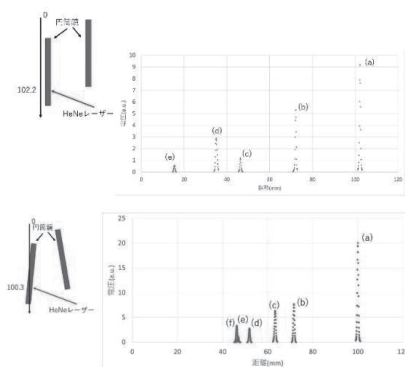


図3 光強度分布測定結果

#### 文献

- 1) T.S. Green and A.J.T. Holmes,  
Rev.Sci.Instrum,**53**,(1982).